

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 1. С. 127–139.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (1): 127–139.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.712;666.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-127-139

EDN: OTWTTA

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВСПЕНЕННЫХ ПРИРОДНЫХ СИЛИКАТОВ

Нина Григорьевна Васильовская¹, Галина Павловна Баранова¹,
Людмила Олеговна Роот², Владимир Иванович Верещагин²

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Национальный исследовательский

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальным в гражданском и промышленном строительстве является уменьшение материалоемкости строительных конструкций и снижение теплопроводности строительных материалов при сохранении достаточной прочности.

Целью работы является исследование плотности, теплопроводности и прочности теплоизоляционных материалов и мелкозернистых бетонов на цементном вяжущем с применением вспененных силикатов. Для получения пористых заполнителей использовались вермикулит Татарского месторождения (Красноярский край), перлиты Хасынского (Магаданская область) и Мухор-Талинского (Республика Бурятия) месторождений, трепел Потанинского месторождения (Челябинская область).

Результаты. Установлено, что прочность материалов на цементном вяжущем с использованием вспененных силикатов определяется прочностью цементного камня, заполнителя и прочностью контактной зоны цементного камня с заполнителем. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов на основе вспененных гранул природного дисперсного сырья (вермикулит, перлит, трепел) на цементной связке (23,5 % об.) находится в границах 0,112–0,181 Вт/(м·К), что в 1,5–1,6 раза больше по сравнению с коэффициентом теплопроводности насыпанного слоя гранул.

Предел прочности при сжатии полученных материалов составляет 2,0–4,0 МПа. Прочность при сжатии легких мелкозернистых бетонов при дополнительном введении кварцевого песка до 32 % об. с использованием пластификатора возрастает до 8,5 МПа в композициях с вермикулитом и до 9,4 МПа в композициях с перлитом Мухор-Талинского месторождения.

В зависимости от содержания кварцевого песка плотность бетонов со вспененным вермикулитом меняется от 1100 до 1400 кг/м³, а со вспененным перлитом – от 1300 до 1600 кг/м³. При этом коэффициенты теплопроводности для бетонов с минимальными плотностями соответствуют значениям 0,193 Вт/(м·К) в композиции с вермикулитом и 0,286 Вт/(м·К) в композиции с перлитом. При максимальных плотностях мелкозернистых бетонов коэффициенты теплопроводности увеличиваются до значений 0,277 и 0,411 Вт/(м·К) соответственно.

Ключевые слова: теплоизоляционный материал, легкий бетон, вспененный заполнитель, вермикулит, перлит, трепел, прочность, плотность, теплопроводность

Для цитирования: Васильевская Н.Г., Баранова Г.П., Рюот Л.О., Верещачин В.И. Исследование теплоизоляционных материалов с использованием заполнителей на основе вспененных природных силикатов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 1. С. 127–139. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-127-139. EDN: OTWTTA

ORIGINAL ARTICLE

HEAT-INSULATING FOAM-SILICATE MATERIALS

Nina G. Vasilovskaya¹, Galina P. Baranova¹,
Lyudmila O. Root², Vladimir I. Vereshchagin²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: The aim of this work is to study the density, thermal conductivity and strength of insulating materials and fine-grained concrete based on cement binder with the use of foamed silicates. Vermiculite from Tatarsky deposit (Krasnoyarsk region), perlite from Khasynsky (Magadan region) and Mukhor-Talinsky (Republic of Buryatia) deposits, and tripoli from Potaninsky deposit (Chelyabinsk region) are used to obtain porous fillers.

Research findings: It was found that the strength of materials based on cement binder and foamed silicates is determined by the strength of hydrated cement, aggregate, and contact zone of hydrated cement and filler. The coefficient of thermal conductivity of insulating materials based on foamed granules of natural dispersed raw materials (vermiculite, perlite, tripoli) with cement (23.5 vol. %) ranges from 0.112 to 0.181 W/(m·deg), which is 1.5–1.6 times higher than thermal conductivity of the granular layer.

Compressive strength of the obtained materials ranges between 2.0 and 4.0 MPa. Compressive strength of lightweight concrete with the silica sand content of 32 vol.% and plasticizer, increases up to 8.5 MPa in compositions with vermiculite and up to 9.4 MPa in compositions with perlite from Mukhor-Talinskoe deposit.

Depending on the quartz sand content, the density of concrete with foamed vermiculite and foamed perlite varies from 1100 to 1400 kg/m³ and from 1300 to 1600 kg/m³, respectively. Thermal conductivity of concretes with minimum density is 0.193 W/(m·deg) in the composition with vermiculite and 0.286 W/(m·deg) in the composition with perlite. At the maximum density of fine-grained concrete, the thermal conductivity increases to 0.277 and 0.411 W/(m·deg), respectively.

Keywords: heat-insulating material, lightweight concrete, foamed filler, vermiculite, perlite, tripoli, strength, solidity, thermal conductivity

For citation: Vasilovskaya N.G., Baranova G.P., Root L.O., Vereshchagin V.I. Heat-insulating foam-silicate materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (1): 127–139. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-127-139. EDN: OTWTTA

Введение

Эффективность строительства включает уменьшение материалоемкости строительных конструкций и снижение теплопроводности строительных материалов при сохранении достаточной прочности, что отражается на несущей способности изделий. Одним из направлений повышения эффективности является разработка и применение легких бетонов с пониженной теплопроводностью [1, 2]. Снижение теплопроводности бетонов связано с использованием как пенобетонов, так и легких бетонов с пористыми заполнителями. В качестве природных пористых заполнителей применяют пемзу и вулканический шлак [3, 4, 5, 6, 7, 8]. В качестве техногенных пористых заполнителей используют зольные микросферы [9, 10, 11, 12], вспененные вермикулиты [13, 14] и перлиты [15], а также пористые гранулы на основе композиций дисперсного кремнеземистого сырья с содой (Na_2CO_3) или щелочью (NaOH) [16, 17, 18, 19].

Целью настоящей работы является исследование зависимости плотности и прочности теплоизоляционных материалов на цементном вяжущем от характеристик пористого заполнителя на основе вспененных пород вермикулита и перлита и пористых гранул из кремнеземистой породы – трепела и исследование изменения прочности мелкозернистых легких бетонов в зависимости от содержания кварцевого песка.

Характеристика исходных материалов и методы

Для получения пористых заполнителей использовались вермикулит Татарского месторождения (Красноярский край), перлиты Хасынского (Магаданская область) и Мухор-Талинского (Республика Бурятия) месторождений, трепел Потанинского месторождения (Челябинская область). Химический состав сырья приведен в табл. 1.

По химическому составу перлиты двух месторождений отличаются незначительно: по содержанию оксидов кремния и алюминия отклонения в границах $(1,00 \pm 0,03)$ масс. %. Отклонения по оксидам магния, железа, титана и натрия не превышают 0,7 масс. %, по стальным оксидам – не более 0,05 масс. %. Химический состав перлитов соответствует области составов технических силикатных стекол. По химическому составу трепел отличается от перлитов большим содержанием кремнезема и меньшим содержанием оксида алюминия. Химический состав вермикулита отвечает приблизительной формуле $(\text{Mg}^{+2}, \text{Fe}^{+2}, \text{Fe}^{+3})_3 [(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}] \cdot (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Однако вермикулит редко отвечает общей формуле и обычно содержит примеси, что подтверждается химическим составом реальной породы вермикулита Татарского месторождения.

В исследованиях применялся цемент типа ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «Красноярский цемент». Минеральный состав цемента в массовых процентах: C_3S – 62,0 %; C_2S – 14,0 %; C_3A – 6,3 %; C_4AF – 13,4 %; гипс – 4,3 %. Химический состав цемента приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сырья

Table 1

Chemical composition of raw materials

Наименование	Содержание оксидов, масс. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	$\Delta m_{пр}$
Трепел Потанинского месторожд.	76,16	7,52	4,1	1,05	0,75	1,23	–	–	–	7,50
Перлит Хасынского месторожд.	70,75	13,74	1,14	1,26	0,37	0,03	0,26	3,63	4,12	3,85
Перлит Мухор- Талинского месторожд.	71,78	12,77	1,54	1,31	0,60	–	0,90	3,00	4,10	5,80
Вермикулит Татарского месторожд.	40,29	10,92	14,47	1,35	17,94	0,63	0,47	1,00	4,08	7,95
Цемент	20,35	4,70	4,15	63,83	2,03	–	–	–	–	1,33

Рентгеновские дифрактограммы использованных перлитов соответствуют аморфной структуре стекла (рис. 1, 2).

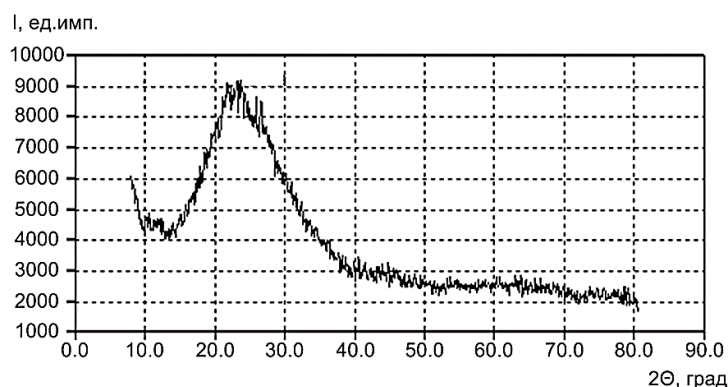


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма перлита Хасынского месторождения (выполнено авторами)

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of perlite from Khasyn deposit

Вспенивание перлитов осуществляется при удалении химически связанной воды при 1000–1100 °С. Вспенивание слоистого вермикулита происходит в процессе удаления химически связанной межпакетной воды при температуре 900–950 °С при увеличении расстояния между слоями в 9–15 раз. Пористые гранулы на основе активированного щелочью трепела получены вспениванием при 780–800 °С за счет воды, выделяющейся в процессе дегидратации гидросиликатов натрия. Характеристики вспененных гранул по размерам, плотности, теплопроводности и прочности приведены в табл. 2.

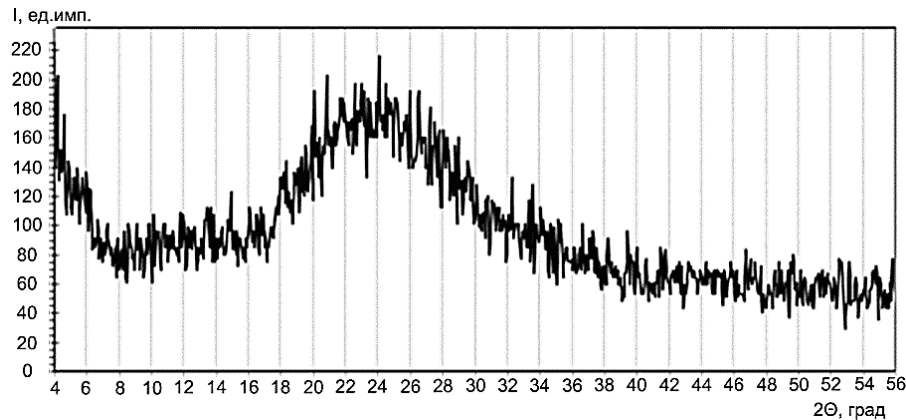


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма перлита Мухор-Талинского месторождения [15]
Fig. 2. X-ray diffraction pattern of perlite from the Mukhor-Talinskoe deposit [15]

Таблица 2

Основные характеристики вспененных гранул из природного сырья

Table 2

Main characteristics of foamed grains from raw materials

Сырьё для вспенивания	Размер гранул, мм	Насыпная плотность ρ_n , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Прочность гранул при сдавливании в цилиндре $\sigma_{сд}$, МПа
Вермикулит Татарского месторожд.	0,5–1,0	180 ± 10	0,074	0,23
Перлит Хасынского месторожд.	0,12–0,15	150 ± 10	0,069	0,50
Перлит Мухор-Талинского месторожд.	1,0–1,5	460 ± 20	0,110	2,78
Трепел Потанинского месторожд.	0,6–1,2	360 ± 20	0,085	0,89

Анализ характеристик вспененных гранул показывает, что меньшие значения насыпной плотности имеют гранулы вспененного перлита Хасынского месторождения (150 кг/м^3) и гранулы вспененного вермикулита (180 кг/м^3). Большая насыпная плотность характерна для вспененных гранул перлита Мухор-Талинского месторождения (460 кг/м^3). Прочность и коэффициент теплопроводности адекватны насыпной плотности гранул.

Для получения легких мелкозернистых бетонов в качестве наполнителя, обеспечивающего прочность, использовался кварцевый песок. Характеристики кварцевого песка по дисперсности, плотности и примесям приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика кварцевого песка

Table 3

Quartz sand properties

Наименование показателя	Значение
Модуль крупности (M_k)	2,15 (средний)
Насыпная плотность, г/см ³	1,55
Истинная плотность, г/см ³	2,50
Полный остаток на сите 0,63, %	45
Содержание зерен крупностью (в % по массе): св. 10 мм св. 5 мм менее 0,16 мм	0 0 3
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	1

Для увеличения подвижности и снижения водоцементного отношения исходной смеси при получении легких мелкозернистых бетонов был использован суперпластификатор на основе поликарбоксилата производства компании MC-Bauchemie.

Теплопроводность определяли на приборе ИТП-МГ4 «100» на образцах размером 100×100 мм, высотой 10 мм. РФА выполнен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4М. Испытания образцов исследуемых материалов проводились в соответствии с ГОСТ 310.3–76, ГОСТ 310.4–81.

В работе применялось оборудование Центра коллективного пользования Научно-образовательного инновационного центра «Наноматериалы и нанотехнологии» ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Результаты и их обсуждение

Первоначально были получены теплоизоляционные композиты, в которых вспененные гранулы связаны цементным камнем. Объемные количества гранул и цемента были одинаковыми в исходных смесях (23,5 % об. – цемент). После заполнения форм водными смесями и 28-суточного твердения образцов определялись свойства полученных теплоизоляционных материалов (табл. 4).

Определялись следующие характеристики: кажущаяся плотность (ρ), прочность при сжатии ($\sigma_{сж}$), коэффициент теплопроводности (λ). Расчетами получены: относительная плотность ($\rho_{от} = \rho/\rho_{ис}$, где $\rho_{ис}$ – истинная плотность), коэффициент конструктивного качества ($K_k = \sigma_{сж}/\rho_{от}$), аддитивная прочность при сжатии ($\sigma_{ад.сж} = 0,765 \sigma_{сж \text{ гранул}} + 0,235 \sigma_{сж \text{ ц.камень}}$).

Анализ полученных результатов (табл. 4) показывает, что при одинаковом отношении объемов вспененных гранул и цементного камня прочность теплоизоляционного материала обеспечивается цементным камнем, а плотность и коэффициент теплопроводности зависят от плотности пористых гранул. Достигнуты прочности 2,0–2,5 МПа при плотности 500 кг/м³; 2,7 МПа

при плотности 800 кг/м^3 , что соответствует прочности теплоизоляционных материалов. Прочность $4,1 \text{ МПа}$ при плотности композита с гранулами вспененного перлита Мухор-Талинского месторождения 1000 кг/м^3 не соответствует теплоизоляционным материалам. Наибольший коэффициент конструктивного качества $12,7$ получен для теплоизоляционного материала с гранулами на основе трепела Потанинского месторождения. Для теплоизоляционных материалов рассчитанная аддитивная прочность композиций ($12,06\text{--}14,02 \text{ МПа}$) превышает фактическую ($2,0\text{--}4,0 \text{ МПа}$) в $4,5\text{--}6,0$ раза. Это связано с тем, что в расчете использована прочность гранул при сдавливании в цилиндре без поправочных коэффициентов, определение которых связано с дополнительными исследованиями.

Таблица 4

Физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов
Table 4

Physical and mechanical properties of heat-insulating materials

Содержание компонентов, % об.	Плотность ρ , кг/м^3 Относительная плотность $\rho/\rho_{\text{ис}}$	Коэффициент теплопроводности λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$, МПа	Коэффициент конструктивного качества $K_{\text{к}}$	Прочность при сжатии цементного камня $\sigma_{\text{цк}}$, МПа	Аддитивная прочность при сжатии $\sigma_{\text{ад}}$, МПа
Вермикулит вспененный – 76,5 Цемент – 23,5	$\frac{800}{0,32}$	0,122	2,7	8,3	50,6	12,06
Перлит Хасынский вспененный – 76,5 Цемент – 23,5	$\frac{500}{0,20}$	0,112	2,0	9,5	50,6	12,27
Перлит Мухор-Талинский вспененный – 76,5 Цемент – 23,5	$\frac{1000}{0,40}$	0,181	4,0	10,3	50,6	14,02
Вспененные гранулы из трепела – 76,5 Цемент – 23,5	$\frac{500}{0,20}$	0,128	2,5	12,7	50,6	12,57

При получении мелкозернистых легких бетонов в исходные смеси с гранулами из вермикулита и перлита дополнительно вводился кварцевый песок (табл. 5). Количество кварцевого песка увеличивалось от $14,3$ до $32,0 \%$ по объему. При этом плотность образцов бетона со вспененным вермикулитом возрастала от 1100 до 1400 кг/м^3 , а образцов со вспененным перлитом – от 1300 до 1600 кг/м^3 . С увеличением содержания кварцевого песка в образцах бетона прочность при сжатии возрастает (рис. 3, 4). Прочность мелкозернистых бетонов со вспененным перлитом без пластификатора в $1,3\text{--}1,5$ раза вы-

ше по сравнению с прочностью бетонов с вермикулитом. С использованием пластификатора увеличение прочности для бетона с перлитом значительно меньше – в 1,03–1,10 раза.

Таблица 5

Составы, плотность и теплопроводность легких мелкозернистых бетонов

Table 5

Composition, solidity and thermal conductivity
of lightweight fine-grained concrete

Обозначение	Содержание компонентов, % об.			Бетон с вермикулитом		Бетон с перлитом	
	Цемент	Кварцевый песок	Вермикулит/перлит	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
1-в(-п)*	23,5	–	76,5	850	0,28	1050	0,31
2-в(-п)	28,0	15,0	57,0	1100	0,31	1300	0,45
3-в(-п)	25,0	25,0	50,0	1300	0,46	1480	0,51
4-в(-п)	20,0	32,0	48,0	1400	0,51	1600	0,56

* Композит без кварцевого песка.

На рис. 3 представлена прочность при сжатии мелкозернистых легких бетонов со вспененным вермикулитом без пластификатора и с пластификатором.

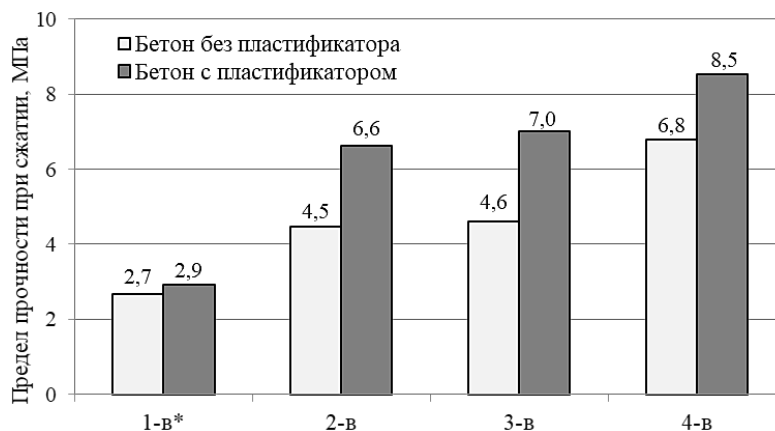


Рис. 3. Изменение прочности при сжатии легких бетонов с вермикулитом в зависимости от содержания кварцевого песка (*композит без кварцевого песка)

Fig. 3. Compressive strength of lightweight concrete with vermiculite vs. quartz sand content (*composite without quartz sand)

Использование пластификатора обеспечивает повышение прочности бетонов с вермикулитом и кварцевым песком в 1,3–1,5 раза. При отсутствии кварцевого песка в композиции увеличения прочности практически нет (рис. 3, 1-в*).

В случае применения пористого заполнителя – вспененного перлита Мухор-Талинского месторождения, наоборот, отмечается небольшое повышение прочности бетонов, содержащих кварцевый песок. Увеличение прочности – в 1,1 раза и меньше (рис. 4). В композиции без кварцевого песка прочность при сжатии образцов с пластификатором составляет 4,5 МПа, что 1,55 раза больше по сравнению с прочностью образцов без пластификатора (2,9 МПа) (рис. 4, 1-п*).

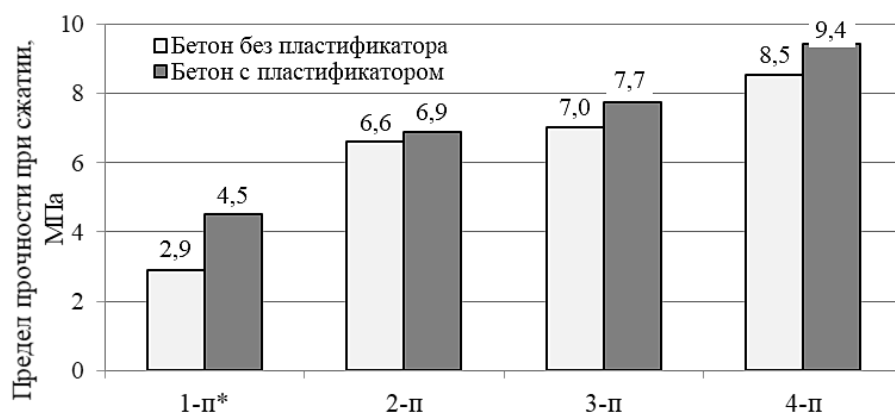


Рис. 4. Изменение прочности при сжатии легких бетонов с перлитом в зависимости от содержания кварцевого песка (*композит без кварцевого песка)

Fig. 4. Compressive strength of lightweight concrete with perlite vs. quartz sand content (*composite without quartz sand)

Прочность мелкозернистых бетонов со вспененным перлитом без пластификатора в 1,3–1,5 раза выше по сравнению с прочностью бетонов с вермикулитом без пластификатора. С использованием пластификатора прочность бетона с перлитом увеличивается до значений 6,9–9,4 МПа в зависимости от содержания кварцевого песка, что представляет небольшое увеличение прочности в 1,03–1,10 раза по сравнению с прочностью бетонов без пластификатора (6,6–8,5 МПа). На рис. 5 показана теплопроводность легких бетонов с пластификатором.



Рис. 5. Теплопроводность легких бетонов с пластификатором

Fig. 5. Thermal conductivity of lightweight concrete with plasticizer

Коэффициент теплопроводности мелкозернистых бетонов со вспененным вермикулитом на 35–65 % меньше по сравнению с бетоном со вспененным перлитом.

Заключение

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов на основе вспененных гранул природного дисперсного сырья (вермикулит, перлит, трепел) на цементной связке (23,5 % об.) находится в границах 0,112–0,181 Вт/(м·К), что в 1,5–1,6 раза больше коэффициента теплопроводности насыпанного слоя гранул. Предел прочности при сжатии полученных материалов находится в пределах 2,0–4,0 МПа, что превышает прочность пеностекла вследствие более высоких плотностей материалов. Коэффициент конструкционного качества соответствует значениям 8,3–12,7: наименьший – для материала со вспененным вермикулитом, наибольший – для материала с пористыми гранулами на основе трепела.

Прочность при сжатии легких мелкозернистых бетонов при дополнительном введении кварцевого песка до 32 % об. с использованием пластификатора возрастает до 8,5 МПа в композициях с вермикулитом и до 9,4 МПа – в композициях с перлитом Мухор-Талинского месторождения. В зависимости от содержания кварцевого песка плотность бетонов со вспененным вермикулитом меняется от 1100 до 1400 кг/м³, а со вспененным перлитом – от 1300 до 1600 кг/м³. При этом коэффициенты теплопроводности для бетонов с минимальными плотностями соответствуют значениям 0,193 Вт/(м·К) в композиции с вермикулитом и 0,286 Вт/(м·К) – в композиции с перлитом. При максимальных плотностях мелкозернистых бетонов коэффициенты теплопроводности увеличиваются до значений 0,277 и 0,411 Вт/(м·К) соответственно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны на их основе* : справочное пособие / под ред. Ю.П. Горлова. Москва : Стройиздат, 1987. 304 с.
2. *Сапелин А.Н.* Лёгкие бетоны нового поколения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 79–83.
3. *Muhtar.* Performance-based experimental study into quality zones of lightweight concrete using pumice aggregates // Case Studies in Construction Materials. 2023. V. 18. e01960. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01960>
4. *Karthika R.B., Vidyapriya V., Nandhini Sri K.V., Beaula K.M.G., Harini R., Sriram M.* Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate // Materials Today: Proceedings. 2021. 43. P. 1606–1613. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>
5. *Hariyadi H.T.* Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate // Procedia Engineering. 2015. V. 125. P. 732–738. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.116>.
6. *Shannag M.J., Charif A., Dghaither S.* Developing structural lightweight concrete using volcanic scoria available in Saudi Arabia // Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. V. 39. P. 3525–3534. URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1019-5>
7. *Rashad A.M.* A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate // Journal of Building Engineering. 2019. V. 25. P.100802. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100802>
8. *Rajeswari S., George S.* Experimental study of light weight concrete by partial replacement of coarse aggregate using pumice aggregate // International Journal of Scientific Engineering and Research. 2015. V. 4. № 5. P. 50–53. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>

9. Гладких И.В., Волынкина Е.П. Утилизация зольных микросфер Западно-Сибирской ТЭЦ при получении безобжиговых композиционных материалов // Экология и промышленность России. 2009. № 2. С. 32–36.
10. Мальцев Е.В., Козлов А.В., Каклюгин А.В., Козлов Г.А. Ячеистые бетоны на основе зольных микросфер Новочеркасской ТЭС // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2003. № 5-2. С. 404–405.
11. Мальцева И.В., Мальцев Е.В. Мелкозернистые конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны на заполнителе из зольных микросфер // Научное обозрение. 2015. № 20. С. 120–123.
12. Теряева Т.Н., Костенко О.В., Исмагилов З.Р., Шикина Н.В., Рудина Н.А., Антипова В.А. Физико-химические свойства алюмосиликатных полых микросфер // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 5 (99). С. 86–90.
13. Енджиевская И.Г., Васильевская Н.Г., Гофман О.В., Игнатьев Г.В. Композиционный материал на основе вспученного вермикулита для огнезащитных покрытий // Фундаментальные исследования. 2016. № 2–1. С. 48–53. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39878>
14. Лотов В.А., Кутугин В.А. Использование термической поризации смесей при получении плит из вспученного вермикулита // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 89–91.
15. Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В., Жерновая Н.Ф. Перлит Мухор-Талы как стекольное сырье // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 3. С. 32–36.
16. Никитин А.И., Стороженко Г.И., Казанцева Л.К., Верещагин В.И. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе трепелов Потанинского месторождения // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 34–36.
17. Казанцева Л.К., Юсупов Т.С., Лыгина Т.З., Шумская Л.Г., Цыплаков Д.С. Пеностекло из механоактивированных бедных цеолитсодержащих пород // Стекло и керамика. 2013. № 10. С. 18–22.
18. Казанцева Л.К. Особенности изготовления пеностекла из цеолитщелочной шихты // Стекло и керамика. 2013. № 8. С. 3–7.
19. Казьмина О.В., Верещагин В.И., Семухин Б.С., Абияка А.Н. Низкотемпературный синтез стеклогранулята из шихт на основе кремнеземсодержащих компонентов для получения пеноматериалов // Стекло и керамика. 2009. № 10. С. 5–8.

REFERENCES

1. Gorlov Yu.P. (Ed.) Artificial porous aggregates and lightweight concrete based on them. Reference guide. Moscow: Stroiizdat, 1987. 304 p. (In Russian)
2. Sapelin A.N. Advanced lightweight concrete. *Vestnik BSTU n.a. V.G. Shukhov*. 2014; (4): 79–83. (In Russian)
3. Muhtar. Performance-based experimental study into quality zones of lightweight concrete using pumice aggregates. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 18: e01960. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01960>
4. Karthika R.B., Vidyapriya V., Nandhini Sri K.V., Beaula K.M.G., Harini R., Sriram M. Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 43: 1606–1613. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>
5. Hariyadi H.T. Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate. *Procedia Engineering*. 2015; 125: 732–738. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.116>
6. Shannag M.J., Charif A., Dghaither S. Developing structural lightweight concrete using volcanic scoria available in Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014; 39: 3525–3534. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1019-5>
7. Rashad A.M. A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*. 2019; 25: 100802. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100802>
8. Rajeswari S., George S. Experimental study of light weight concrete by partial replacement of coarse aggregate using pumice aggregate. *International Journal of Scientific Engineering and Research*. 2015; 4 (5): 50–53. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>
9. Gladkikh I.V., Volynkina E.P. Utilization of ash microspheres from the West Siberian thermal power plant in the production of non-firing composite materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2009; (2): 6.

10. Mal'tsev E.V., Kozlov A.V., Kaklyugin A.V., Kozlov G.A. Cellular concrete based on ash microspheres at Novocherkassk Thermal Power Plant. *Vestnik BSTU n.a. V.G. Shukhov*. 2003; 5-2: 404–405. (In Russian)
11. Mal'tseva I.V., Mal'tsev E.V. Fine-grained structural and thermal insulation lightweight concrete with filler made of ash microspheres. *Nauchnoe obozrenie*. 2015; 20: 120–123. (In Russian)
12. Teryaeva T.N., Kostenko O.V., Ismagilov Z.R., Shikina N.V., Rudina N.A., Antipova V.A. Physicochemical properties of aluminosilicate hollow microspheres. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013; 5(99): 86–90. (In Russian)
13. Endzhievskaya I.G., Vasilovskaya N.G., Gofman O.V., Ignat'ev G.V. Composite material based on expanded vermiculite for fire retardant coatings. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016; 2-1: 48–53. (In Russian). Available: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39878>
14. Lotov V.A., Kutugin V.A. The use of thermal porous mixtures in the production of expanded vermiculite slabs. *Stroitel'nye materialy*. 2015; (5): 89–91. (In Russian)
15. Zhernovoi F.E., Miroshnikov E.V., Zhernovaya N.F. Mukhor-Taly perlite as glass raw material. *Vestnik BSTU n.a. V.G. Shukhov*. 2012; (3): 32–36. (In Russian)
16. Nikitin A.I., Storozhenko G.I., Kazantseva L.K., Vereshchagin V.I. Heat-insulating materials and products on the basis of tripolis of Potanin deposit. *Stroitel'nye materialy*. 2014; (8): 34–36. (In Russian)
17. Kazantseva L.K., Yusupov T.S., Lygina T.Z., Shumskaya L.G., Tsyplakov D.S. Foam glass from mechanoactivated zeolite-poor rock. *Glass and Ceramics*. 2014; 70 (9–10): 360–364. <https://doi.org/10.1007/s10717-014-9580-7>
18. Kazantseva L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch. *Glass and Ceramics*. 2013; 70 (7–8): 277–281. <https://doi.org/10.1007/s10717-013-9560-3>
19. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Semukhin B.S., Abiyaka A.N. Low-temperature synthesis of granular glass from mixes based on silica-alumina-containing components for obtaining foam materials. *Glass and Ceramics*. 2009; 66 (9–10): 341–344. <https://doi.org/10.1007/s10717-010-9193-8>

Сведения об авторах

Васильевская Нина Григорьевна, канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10, vasng46@mail.ru

Баранова Галина Павловна, канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10, putinap@mail.ru

Рюм Людмила Олеговна, канд. техн. наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, tolbanowa@tpu.ru

Верещагин Владимир Иванович, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, vver@tpu.ru

Authors Details

Nina G. Vasilovskaya, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79/10, Svobodnyy Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, vasng46@mail.ru

Galina P. Baranova, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79/10, Svobodnyy Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, putinap@mail.ru

Lyudmila O. Root, PhD, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, tolbanowa@tpu.ru

Vladimir I. Vereshchagin, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, vver@tpu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.01.2024
Одобрена после рецензирования 01.02.2024
Принята к публикации 02.02.2024

Submitted for publication 24.01.2024
Approved after review 01.02.2024
Accepted for publication 02.02.2024